

# 土地利用及其变化对洮儿河流域中上游地区 非点源污染的影响

柳玉梅<sup>1,2</sup>, 李丽娟<sup>1</sup>, 梁丽乔<sup>1</sup>, 曾红伟<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

**摘 要:** 在分析洮儿河流域上中游地区 1970—2000 年土地利用变化的基础上, 利用长期水文影响模型估算研究区内非点源污染物的输出负荷, 分析其空间分布特征, 并引入单位贡献指数分析不同土地利用类型对不同污染物的影响程度。结果表明: (1) 在这 30 a 间, 研究区的土地利用以草地、林地和农业用地为主, 土地利用结构变化特征显著, 生态用地面积大幅度减少, 非生态用地面积迅速增加, 研究区内人类活动增强并有加剧生态退化的趋势; (2) 在这 30 a 间, 研究区内非点源污染负荷总量从 3 400 t 上升到 6 200 t, 总氮(TN)、总磷(TP)的高负荷分布区域主要集中在中游, 并有向上游扩张的明显趋势; (3) 采用贡献率和单位贡献指数(UCI)2 个指标分析不同土地利用类型对非点源污染物 TN, TP 的影响, UCI 能更好地反映土地利用对非点源污染的影响, 其中农业用地对非点源污染的影响程度最大, 住宅用地和工业用地次之, 林地和草地影响最小。

**关键词:** 土地利用变化; 非点源; L-THIA; 洮儿河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)01-0117-05

中图分类号: X522, X821

## Effects of Landuse Change on Non-Point Source Pollution in Upper and Middle Reaches of Taoer River Basin

LIU Yu-mei<sup>1,2</sup>, LI Li-juan<sup>1</sup>, LIANG Li-qiao<sup>1</sup>, ZENG Hong-wei<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;*

*2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

**Abstract:** Land use patterns from 1970 to 2000 were analyzed to determine the changes in the study area. On this basis, long-term hydrologic impact assessment (L-THIA) model was used to evaluate the long-term average non-point source(NPS) pollution loads and to simulate their spatial distributions. Unit contribution index(UCI) was introduced to assess the impacts of various land-use categories to annual average NPS pollutant production. The results are as followed. (1) From 1970 to 2000, farmland, forest and grassland were the primary land use types in this area; ecological land area decreased dramatically with rapidly increased non-ecological lands, implying intensified human activities and the tendency of ecological recession. (2) During the past 30 years, NPS pollution loads rose from 0.34 million tons to 0.62 million tons; the areas of high TN and TP loads distributed mainly in the middle reach but has expanded to the upper reach considerably. (3) Contribution rate(CR) and UCI were calculated to analyze the relationship between land use types and NPS pollution, with UCI reflecting more closely the impacts of land use change to NPS pollution. Farmlands had the most significant impact on NPS pollutants and were identified as the main source, followed by residential and industrial lands, and forest and grasslands.

**Keywords:** land use change; non-point source(NPS); L-THIA; Taoer River basin

非点源污染(non-point source pollution, NPS) 是伴随着降水过程产生的地表径流污染, 它是溶解 的或固体的污染物从非特定的地点, 在降水和径流的冲刷作用下通过径流过程汇入接纳水体, 如河流、湖

泊、水库、海湾等,从而引起的水体污染<sup>[1]</sup>。近年来,非点源污染对水体污染所占的比重呈逐渐上升趋势,已经成为影响流域水质的主要污染形式。非点源污染物的类型主要有泥沙、营养物(以 N,P 为主)、可降解有机物(BOD 和 COD)、有毒有害物质(重金属等)及溶解性固体等<sup>[2]</sup>。从非点源污染的形成过程可知,它与流域的经济发展水平、人口数量、人类活动状况、土地利用/覆盖类型以及气候水文特征密切相关<sup>[3]</sup>。Novotny<sup>[4]</sup>对土地利用变化对水环境的影响进行了研究,结果表明土地利用变化是水文及水环境过程的主要影响因素,它对水环境的作用以非点源污染为主。Mander<sup>[5]</sup>和 Gburek 等<sup>[6]</sup>人研究表明,非点源污染物的来源与河流水质以及土地利用类型关系密切。沈涛等<sup>[7]</sup>对密云水库地区的非点源污染研究认为不同土地利用类型的污染物输出负荷是不同的。王秀娟等<sup>[8]</sup>对松辽流域的非点源污染研究发现,近 15 a 来由土地利用造成的非点源污染负荷呈明显的上升趋势。因此,深入认识和研究土地利用/覆盖变化对洮儿河流域非点源污染的影响具有重要的意义。

本文利用长期水文影响模型(long-term hydrological impact analysis, L-THIA)对洮儿河中上游流域的非点源污染物总氮、总磷年均负荷进行估算,并对不同污染物负荷与土地利用类型之间的关系进行了深入研究,其结果可为该流域经济发展及生态环境保护提供决策依据。

## 1 研究区概况

洮儿河发源于大兴安岭东麓,是嫩江下游右侧最大的支流,全长 563 km。本文研究区位于洮儿河流域上、中游地区,地处松嫩平原西部,地跨内蒙古自治区兴安盟的科尔沁右翼前旗、突泉县,吉林省白城市的洮北区、洮南市,属于温带大陆性季风气候区,是东北西部地区景观的缩影,典型的生态环境敏感带和脆弱区,面积为 27 633 km<sup>2</sup>。研究区的降水和气温的年内和年际变化较大,多年平均降水量为 427 mm,6—9 月份降水量占全年的 83%左右。降雨多以暴雨形式出现,降雨强度大,侵蚀力强,为流域非点源污染提供了强大的动力。研究区上游以山丘区和半山区为主,土壤肥沃,有机质含量高,植被较好,水流流速较快;中游为低山丘陵和平原区,耕地分布广泛,植被覆盖差,水土流失严重。研究区处于东北植物区系、华北植物区系和蒙古植物区系的交汇地带,植被类型以森林和草原为主。1970—2000 年间,随着经济的快速发展和人口急剧增长,研究区耕地面积不断扩张,林地、草地和湿地面积大幅减少,工业废污水的排放量

急剧增长,化肥、农药的大量使用,导致该地区的水环境质量不断下降,严重制约了地区的经济社会发展。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 非点源污染负荷的估算方法

本文采用 L-THIA 模型<sup>[9]</sup>进行流域非点源污染负荷的预测,该模型是以 Arcview 为平台,利用长期的气候和土地利用数据及土壤数据对径流量和非点源污染进行模拟。其运算核心是基于美国农业部土壤保护局的经验数据建立起来的降雨、土地利用参数与径流深之间关系的 SCS—CN(curve number)法。CN 取值范围在 0~100,但实际运用中需结合研究区域自然条件,根据前期降雨指数 AMC (antecedent moisture condition) 对 CN 值进行修正<sup>[7]</sup>。在利用 SCS 法得出多年平均径流量后,通过土地利用与地表径流面源污染物浓度的定量关系,采用 GIS 的空间分析与统计方法,估算得出面源污染负荷并进行空间分布显示,模型详细过程如图 1 所示。

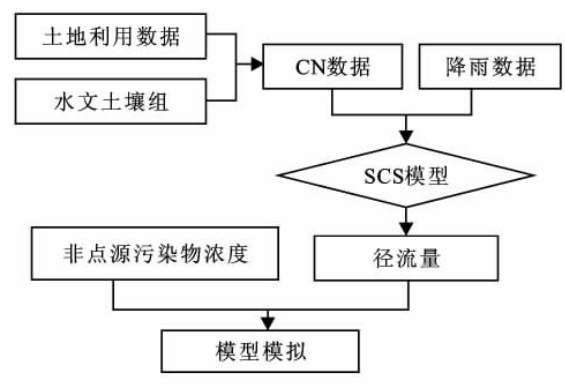


图 1 L-THIA 模型过程

### 2.2 土地利用对非点源污染负荷的贡献率

本文引入了单位贡献率指数(UCI)<sup>[10]</sup>来分析不同的土地利用类型对流域非点源污染负荷产生的影响。表达式如下:

$$\varphi_{ij} = \bar{\varphi}_{ij}(t) = \text{mean}[\varphi_{ij}(t)] \quad (1)$$

式中: $\varphi_{ij}$ ——UCI,单位贡献率指数, $\varphi_{ij}(t)$ 的平均值。

$$\varphi_{ij}(t) = \frac{p[\text{NPS}_{ij}(t)]}{p[S_i(t)]} = \frac{\text{NPS}_{ij}(t)}{c_j(t)S_i(t)} \quad (2)$$

式中: $p[\text{NPS}_{ij}(t)]$ —— $t$ 年,第  $i$  种土地利用类型产生第  $j$  种 NPS 污染物占  $j$  种 NPS 污染物总量的比例(%); $p[S_i(t)]$ —— $t$ 年,第  $i$  种土地利用类型的面积占总面积的百分比(%); $\text{NPS}_{ij}(t)$ —— $t$ 年,第  $i$  种土地利用类型产生的第  $j$  种 NPS 污染物的量; $S_i(t)$ —— $t$ 年,第  $i$  种土地利用类型的面积; $\varphi_{ij}(t)$ —— $t$ 年,第  $i$  种土地利用类型对第  $j$  种 NPS 污染物单位贡献度。

$$c_j(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \text{NPS}_{ij}(t)}{\sum_{i=1}^n S_i(t)} \quad (i=1, \dots, n; j=1, \dots, m) \quad (3)$$

式中:  $\sum_{i=1}^n \text{NPS}_{ij}(t)$ —— $t$  年, 研究区第  $j$  种 NPS 污染负荷总量;  $\sum_{i=1}^n S_i(t)$ —— $t$  年, 研究区总面积;  $c_j(t)$ —— $t$  年, 研究区内单位面积上的第  $j$  种 NPS 污染物的含量, 常数。

### 2.3 数据来源与处理

(1) 土地利用数据。采用 20 世纪 70 年代初期和 2000 年 2 期, 空间分辨率均为 1:10 万土地利用数据, 来源于中国科学院资源环境科学数据中心, 是通过 Landsat TM 遥感影像获取的。本文在此基础上对土地利用分类进行了归纳与合并, 并在 Arcgis 9.3 中进行了格式转化, 获得满足模型输入格式的土地利用图。由于土地利用数据在短时间之内不会发生巨大变化, 因此, 本文在模拟 1970 年的非点源污染时, 将 70 年代初期的土地利用数据作为其基本土地利用数据。

(2) 土壤水文数据。土壤数据包括土壤的空间数据与属性数据, 来源于中国科学院资源环境科学数据中心与中国科学院南京土壤研究所。土壤数据空间分辨率为 1:100 万, 主要用于土壤水文组的划分。研究区上游主要的土壤类型为黑钙土亚类、暗棕壤亚类、草甸土亚类; 中游地区主要为黑钙土亚类、栗钙土亚类、暗栗钙土亚类及草甸土亚类<sup>[11]</sup>。采用国际标准的砂粒、粉粒和黏粒的划分方法, 按照其组合比例确定其所属的土壤水文组, 最后将其分为 A, B, C 这 3 类, 其中 B 类面积最大。A 类: 在完全湿润的条件下具有较高渗透率的土壤, 土壤质地主要由砂砾石组成, 排水能力、导水能力较强; B 类: 在完全湿润的条件下具有中等渗透率的土壤, 土壤质地由沙壤质组成, 排水、导水能力都属于中等; C 类: 在完全湿润的条件下具有较低渗透率的土壤, 土壤质地为黏壤土、薄层沙壤土, 大多有一个阻碍水流向下运动的层, 下渗率和导水能力较低。

(3) 降雨数据。采用 1961—2000 年 40 a 的日降雨量数据, 来源于国家气象局。日降雨数据均按模型要求转换成相应格式。

(4) CN 值的确定。CN 是 SCS 模型中重要的无量纲参数, 其大小可以间接地反映流域的产流能力。CN 的取值会直接影响到径流量的计算精度。本文参照美国土壤保护署给出的不同土壤水文组条件下的各种土地利用类型的 CN2 值(AMC II 条件), 结合研究区的自然条件确定了研究区的 CN2 值(表 1)。

表 1 研究区 CN 值表

土地利用类型	水文土壤组	CN 值
农地	A	51
	B	72
	C	76
林地	A	30
	B	55
	C	70
草地	A	39
	B	61
	C	79
住宅用地	A	46
	B	68
	C	77
工业用地	A	81
	B	88
	C	91

### 2.4 模型效果验证

为了验证模型在这一区域的适用性, 将研究区 2000 年实测的污染物浓度根据“二源分割法”<sup>[12]</sup> 换算得到流域非点源污染物总负荷值, 与模拟值进行比较。由于缺乏 TP 的实测值, 这里只对 TN 和 TSS 进行了验证。结果显示, 模拟值与实测值的相对误差为 11.43%~15.81%, 对于洮儿河流域这种大尺度研究区域而言, 模拟精度在可接受的范围之内。因此, 可以使用 L-THIA 模型模拟该地区的 NPS 污染。

## 3 结果与分析

### 3.1 土地利用类型变化

由表 2 可知, 林地、草地和农业用地是洮儿河上游流域最主要的土地利用类型, 1970—2000 年 3 种土地利用类型均占到整个流域面积的 90% 以上。不同土地类型之间此消彼长的特征明显, 其中尤以农业用地面积变化最为显著(工业用地变化幅度也较明显, 但其总面积非常小, 故而忽略)。近 30 a, 农业用地所占的比重在逐步增加, 分别由 1970 年的 13.04% 增加至 2000 年的 30.47%, 增幅为 133.67%; 林地、草地及水域面积均有不同程度的减少, 减小幅度分别为 27.93%, 10.63% 和 71.89%; 工业用地、住宅用地及盐碱地的比例有所上升, 增长幅度分别为 100%, 33.79% 及 28.28%。总体来看, 1970—2000 年期间土地利用结构变化特征显著, 林地、草地和水域等生态用地的面积大幅度减少, 而农业用地、工业用地和住宅用地等非生态用地的面积迅速增加, 这一特征表明, 近 30 a 来洮儿河中上游流域人类活动强度增大, 对区域生态环境的扰动作用增强。

表 2 1970 年和 2000 年土地利用变化情况

土地利用类型	占总面积的比例/%		变幅/%
	1970 年	2000 年	
草地	43.08	38.50	-10.63
林地	35.66	25.70	-27.93
农业用地	13.04	30.47	133.67
工业用地	0.02	0.04	100.00
住宅用地	1.45	1.94	33.79
盐碱地	1.45	1.86	28.28
水域	5.30	1.49	-71.89

### 3.2 非点源污染负荷空间分布模拟

利用 L-THIA 模型,在 Arcview 软件的支持下得到 1970 年,2000 年研究区内非点源污染 TN 和 TP 负荷的空间分布状况(附图 1)。从附图 1 可以看出,从 1970—2000 年期间,洮儿河流域中上游地区非点源 TN,TP 的高负荷分布区域主要集中在中游,最主要的原因是由于中游地区社会经济发展以农为主,农业活动较集中,农业用地占有很大的比重,土地利用率高;而上游以牧为主,主要土地利用类型为草地和林地,因此非点源污染物的产生量相对较低。与 1970 年相比,2000 年非点源 TN,TP 的高负荷区均出现向上游扩张的现象。这主要基于两方面的原因:首先是近 30 a 间在经济发展的驱动作用下,中游及上游部分沿河地区农业用地迅速扩张,工业用地及住宅用地亦大幅增加,而林地和草地面积逐渐减小,从而导致了非点源污染高负荷区的扩张;其次,随着耕地的扩张,及粮食高产的利益追求,该区域的化肥用量不断增加。其中平均施肥量由 70 年代末期的 297.3 kg/hm<sup>2</sup> 增加至 2000 年的 648.6 kg/hm<sup>2</sup>。在中国一直存在化肥过量施用的现象,据研究统计,由于肥料的不合理施用,肥料的利用效率很低,尤其是氮肥,当季氮肥的利用率仅为 30%~35%,剩余的 70% 随径流流入河、湖,导致肥料的经济效益降低和严重的非点源污染<sup>[13]</sup>。综合表 2 及附图 1 可以发现,非点源污染高负荷区的变化趋势和土地利用类型变化关系密切,土地利用类型对非点源污染的影响较大。

### 3.3 不同土地利用类型非点源污染物输出负荷

分别计算研究区内各种土地利用类型对非点源污染物 TN,TP 的贡献率(表 3),总体而言,不同土地利用类型对非点源污染物的贡献率大小的排序在这 30 a 间基本一致,即对非点源 TN 负荷的贡献率为农业用地>林地>草地>住宅用地>工业用地,对非点源 TP 负荷的贡献率为农业用地>住宅用地>林地>草地>工业用地。这种变化的趋势与土地利用的关系密切,在这期间,洮儿河中上游流域的林地和草

地的面积逐渐缩小,而农工业用地和城镇用地的面积逐渐变大。从 1970—2000 年,农业用地对 TN,TP 的贡献率一直最高,且有变大的趋势,究其原因,一方面是因为农业用地的面积所占比例较大,且扩张迅速,1970 年农业用地面积占总面积的 13.04%,而至 2000 年,增至 30.47%,增长了 1.34 倍;另一方面是因为流域内农业活动比较频繁,且伴随着农业用地面积的增加,化肥施用量大幅增加,而作物的吸收率有限,因此导致大量的肥料流失,造成非点源污染现象的加重。在这 30 a 间,林地和草地对非点源污染物的贡献率有所下降,主要原因是其面积的减少;工业用地的贡献率一直最小,主要原因是该区域工业用地面积较小,因为该研究区经济以农业为主,工业不发达,其中研究区内的白城地区社会经济以农业为主,经济落后,其中洮南市为省级贫困县(市),而兴安盟以农牧业为主,工业经济占 GDP 比重仅为 20% 左右。

表 3 不同土地利用类型对非点源总氮、总磷的贡献率 %

土地利用类型	1970 年		2000 年	
	TN	TP	TN	TP
农业用地	64.98	91.93	83.91	95.66
林地	17.86	1.22	6.89	0.38
草地	13.19	0.90	6.17	0.34
住宅用地	3.95	5.93	2.92	3.53
工业用地	0.02	0.02	0.11	0.10

不同的土地利用类型对非点源污染物 TN,TP 的影响程度不同,为了客观地评判不同的土地利用类型对非点源污染物的影响,剔除土地利用类型面积的影响,表 4 给出了根据公式(1)~(3)计算得出研究区不同土地利用类型对非点源污染物 TN,TP 的单位贡献指数(UCI)。总体而言,对于 TN,UCI 值的大小顺序为:农业用地>住宅用地>工业用地>林地>草地,TP 的 UCI 值排序特征与 TN 一致,即在 1970—2000 年期间,研究区的农业用地对非点源污染物 TN,TP 的产生的影响程度最大,住宅用地次之,之后为工业用地和林地,草地的影响程度最小。其中,如农业用地对 TP 的 UCI 值最高(4.74),农业用地对 TN 的 UCI 值次之(3.61),林地对 TP 的 UCI 值最低(0.02)。住宅用地及工业用地的 UCI 值明显高于林地和草地,其主要原因是前两种土地利用类型对径流、泥沙的影响较大,因此尽管其面积较小,但 UCI 值较高。而森林和草地对各种污染物的截留效果较好<sup>[7]</sup>,对非点源污染的影响较小,因此其 UCI 值较低。这个结果所反映的不同土地利用类型对非点

源污染物的影响程度与贡献率有所不同,主要原因是 UCI 消除了面积对非点源污染负荷的影响,凸显了土地利用类型对非点源污染的影响,其结果能更好地反映长时段土地利用类型对地区非点源污染的影响。由表 3 还可以得出,同一种土地利用类型对不同的非点源污染物的影响程度也是不同的。例如农业用地和住宅用地对 TP 的影响程度要高于对 TN 的影响,而林地、草地及工业用地均相反。这一结果与对贡献率的影响结果一致。

表 4 不同土地利用类型对非点源污染物负荷的单位贡献指数 (UCI)

污染项目	农业用地	林地	草地	住宅用地	工业用地
TN	3.61	0.36	0.22	2.01	1.93
TP	4.74	0.02	0.14	2.80	1.76

## 4 结论

本研究在分析了洮儿河中上游流域 1970—2000 年土地利用变化的基础上,利用 L-THIA 模型,对研究区这 30 a 间由土地利用变化所产生的非点源污染负荷 TN,TP 进行了空间分布模拟及总量预测,在此基础上得出以下结论。

(1) 研究区土地利用以农地、草地和林地为主,土地利用结构变化特征显著,林地、草地和水域的面积大幅度减少,而农地、工业用地和住宅用地的面积显著增加,说明研究区内人类活动的影响增强并有加剧生态退化的趋势。

(2) 研究区内非点源 TN,TP 的高负荷分布区域主要集中在中游,并有向上游扩张的明显趋势。这一特征说明非点源污染与土地利用类型的关系密切,随着中游及上游部分沿河地区农地的迅速扩张,工业用地及住宅用地大幅增加,而林地和草地面积逐渐减小,非点源污染高负荷区也相应地扩张。

(3) 采用贡献率和单位贡献指数(UCI)2 个指标来分析不同的土地利用类型对非点源污染物 TN,TP 的影响,结果表明农地对该区域非点源污染的影响程度最大。其中,从贡献率的角度分析,对 TN 的影响以农地为最大,林地、草地次之,住宅用地和工业用地最小;对 TP 的影响的农地为最大,住宅用地次之,林地和草地再次,最小的为工业用地。从 UCI 的角度分析,对 TN 和 TP 的影响以农业用地为最大,住宅用地、工业用地次之,林地和草地最小;主要原因

是 UCI 消除了面积对非点源污染负荷的影响,凸显了土地利用类型对非点源污染的影响,其结果能更好地反映长时段土地利用类型对地区非点源污染的影响。

### [参 考 文 献]

- [1] 贺缠生,傅伯杰,陈利顶. 非点源污染的管理及控制[J]. 环境科学,1998,19(5):87-91.
- [2] 程声通. 环境系统分析教程[M]. 北京:北京化学工业出版社,2006:111-112.
- [3] 李嘉峻,许有鹏,桑银江,等. GIS 支持下的土壤侵蚀动态变化研究[J]. 南京大学学报:自然科学版,2005,41(3):297-303.
- [4] Novotny V. Water quality: Diffuse pollution and watershed management[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2003:385-387.
- [5] Mander U, Kull A, Tamm V, et al. Impact of climatic fluctuations and land use change on runoff and nutrient losses in rural landscape [J]. Landscape and Urban Planning, 1998,41:229-238.
- [6] Gburek W J, Folmar G J. Flow and chemical contributions to streamflow in an upland basin: A baseflow survey[J]. Journal of Hydrology, 1999,217:1-18.
- [7] 沈涛,刘良云,马金峰,等. 基于 L-THIA 模型的密云水库地区非点源污染空间分布特征[J]. 农业工程学报,2007,23(5):62-68.
- [8] 王秀娟,刘瑞民,何孟常. 土地利用及其变化对松辽流域非点源污染影响研究[J]. 地理科学,2009,29(4):555-560.
- [9] Harbor J. A practical method for estimating the impact of land-use change on surface runoff, groundwater recharge and wet-land hydrology[J]. Journal of American Planning Association, 1994,60(1):95-108.
- [10] Bai X, Ma K M, Yang L, et al. Simulating the impacts of land-use changes on non-point source pollution in Lugu Lake watershed[J]. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2008,15:18-27.
- [11] 史学正,于东升,潘贤章,等. 我国 1:100 万土壤数据库及其应用[M]. 北京:科学出版社,2004:142-145.
- [12] 杨育红,阎百兴,沈波,等. 第二松花江流域非点源污染输出负荷研究[J]. 农业环境科学学报,2009,28(1):161-165.
- [13] 中国环境与发展国际合作委员会. 中国农业非点源污染控制工作组的政策建议. (2008-06-23) [2010-04-19]. [http://big5.china.com.cn/tech/zhuanti/wyh/2008-06/23/content\\_15873936.htm](http://big5.china.com.cn/tech/zhuanti/wyh/2008-06/23/content_15873936.htm). 2001.